

SISÄINEN RAVINNEKUORMITUS VESIJÄRVEN ENONSELÄLLÄ 2009

FT Juha Niemistö
Prof. Jukka Horppila
Fil. yo Perttu Tamminen
Helsingin yliopisto, ympäristötieteiden laitos

1. Johdanto

Järven kunnostusta suunniteltaessa yksi tärkeimmistä tehtävistä on selvittää sisäisen ravinnekuormituksen taso (esim. Saarijärvi & Sammalkorpi 2005). Vasta kun tiedetään sisäisen kuormituksen taso suhteessa ulkoiseen kuormitukseen, voidaan kunnostustoimenpiteet suunnata oikein. Lahden Vesijärven Enonselkä on toistuvien voimakkaiden leväkukintojen ja alusveden hapettomuuden vuoksi kunnostustoimenpiteiden tarpeessa. Enonselän leväkukintoja säätelee voimakkaasti tärkeä ravinne fosfori, jonka vapautumiseen pohjasedimentistä pyritään vaikuttamaan loppuvuodesta 2009 aloitetulla hapetusprojektilla. Hapetus, jolla pyritään vaikuttamaan fosforin sisäiseen kiertoon, saattaa vaikuttaa myös järven kerrostuneisuuden pysyvyyteen ja alusveden lämpötilaan (Liboriussen ym. 2009). Vaikka fosforin anaerobista vapautumista voidaan vähentää happioloja parantamalla, kerrostuneisuuden heikkeneminen voi voimistaa sedimentin resuspendoitumista (resuspensio = jo pohjalle sedimentoituneen aineksen palaaminen vesipatsaaseen esim. tuulten aiheuttamien veden virtausten vaikutuksesta) ja fosforin siirtymistä sedimentistä vesipatsaaseen. Jos hapetus nostaa alusveden lämpötilaa, se saattaa johtaa hajotuksen voimistumiseen ja edesauttaa fosforin vapautumista (Thamdrup ym. 1998, Liboriussen ym. 2009). Näin ollen jo käynnistettyjen kunnostustoimenpiteiden seuraamiseksi ja mahdollisesti tulevaisuudessa tehtävien toimenpiteiden ja suunnittelemiseksi Enonselän sisäinen fosforikuormitus selvitettiin avovesikauden 2009 aikana.

2. Aineisto ja menetelmät

Tässä tutkimuksessa laskettiin Vesijärven Enonselän sisäinen fosforikuormitus avovesikaudelle 2009 käyttäen (2.1) ravinnetaseyhtälöä ja (2.2) sedimentin resuspensionopeuden laskemiseen perustuvaa menetelmää.

2.1 Ravinnetaseyhtälö

Enonselän sisäinen fosforikuormitus laskettiin ravinnetaseyhtälöllä

$$UK + SK = LP + BS + dm/dt \quad (\text{Lappalainen \& Matinvesi 1990}),$$

jossa

UK = ulkoinen kuormitus

SK = sisäinen kuormitus

LP = luusuasta poistuva ainevirta

BS = bruttosedimentaatio

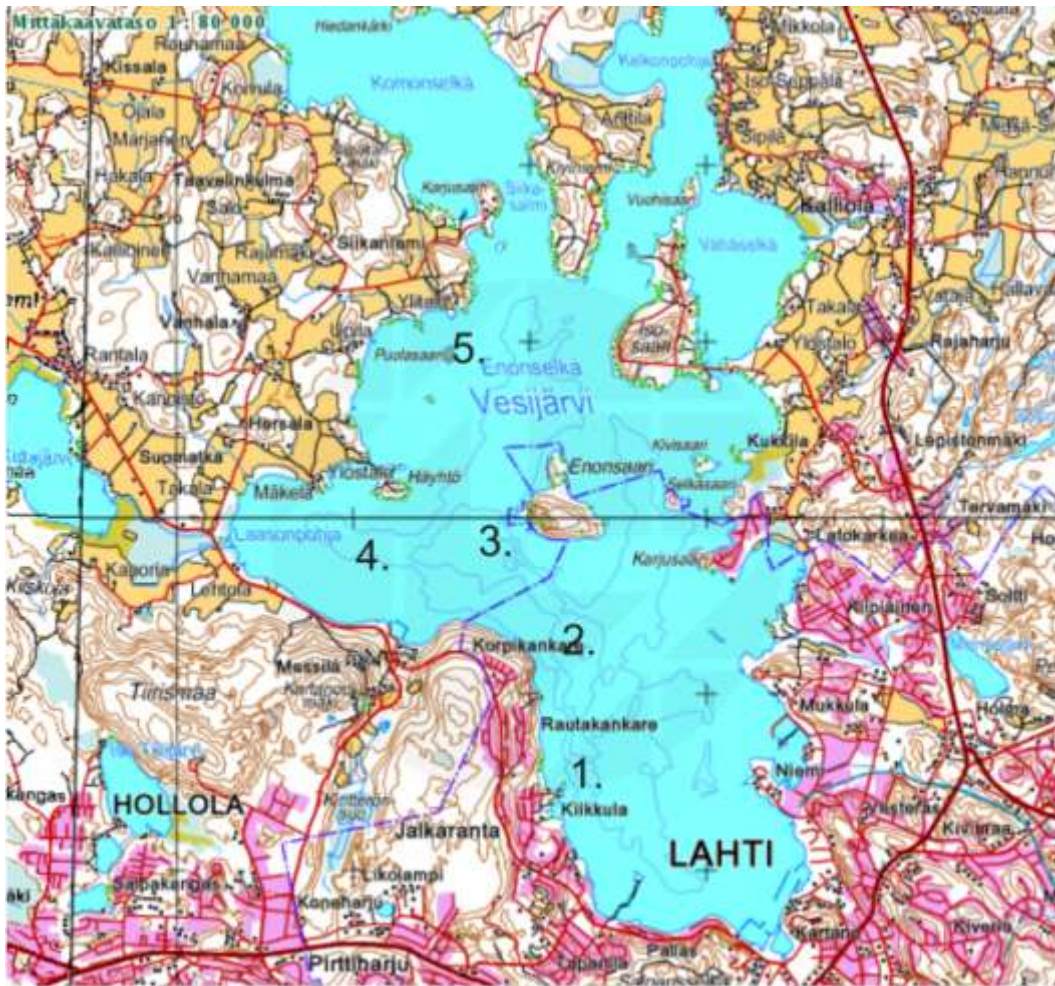
dm/dt = vesimassan ainesisällön muutos

Yhtälöstä voidaan laskea sisäinen kuormitus jäännösterminä

$$SK = LP + BS + dm/dt - UK$$

Ulkoisen kuormituksen arvot ja luusuasta poistuva ainevirta saatiin Lahden seudun ympäristöpalveluilta. Luusuasta poistuvaan ravinnevirtaan yhdistettiin myös hoitokalastuksen mukana poistuvat ravinteet. Vesimassan fosforisisällön muutos laskettiin avovesikauden aikana tehtyjen kokonaisfosforimittausten perusteella. Vesinäytteet ravinnemäärityksiä varten otettiin aikavälillä 14.5.–4.11. 2009 kaksitoista kertaa. Matalilla alueilla näytteet otettiin kokoomanäytteestä pinta-pohja ja syvillä alueilla kokoomanäytteistä 0–10 m, 10–20 m ja 20 m-pohja (Limnos putkinoudin, korkeus 1 m, V=7,1 litraa). Fosforipitoisuudet määritettiin Lachat autoanalysointilaitteella standardin SFS 3025 mukaisesti (ammoniummolybdaattivärjäys, mittaus aallonpituudella 700 nm).

Fosforin bruttosedimentaatio laskettiin sedimentaatiokeräimillä mitatun laskeutuvan aineksen määrän ja aineksen fosforipitoisuuden tulona. Kattavien ja alueellisesti luotettavien bruttosedimentaatiotulosten saamiseksi sedimentaatiokeräimiä oli sekä matalilla (syvyys < 10 m, 3 pistettä) että syvillä (syvyys > 10 m, 2 pistettä) alueilla (kuva 1). Jokaisessa keräimessä oli neljä rinnakkaista sedimentaatioputkea sijoitettuna kahden metrin etäisyydelle pohjasta. Keräimet olivat järvestä 14.5.–4.11. 2009 ja ne tyhjennettiin 2–4 viikon välein. Laskeutuvan aineksen kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) ICP (inductively coupled plasma) massaspektrometrillä typpihappohajotuksen jälkeen.



Kuva 1. Sedimentaatiokeräinten sijainti Enonselällä 2009 (1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syväne, 3. Enonsaaren syväne, 4. Messilä, 5. Puolasaari).

2.2 Resuspensionopeuteen perustava menetelmä

Koska sedimentin resuspensio muodostaa usein n. 80 % järven bruttosedimentaatiosta (Weyhenmeyer, 1998), sitä on syytä tarkastella suurimpana yksittäisenä sisäistä kuormitusta aiheuttavana tekijänä.

Sedimentin resuspensionopeus laskettiin regressioyhtälön avulla, jossa suspendoitunut epäorgaaninen aines (SPIM) on selittävä muuttuja ja suspendoitunut orgaaninen aines (SPOM) selitettävä muuttuja (Weyhenmeyer 1997). Jokaisesta avovesikauden sedimentaatiomittauksesta (yksitoista mittaussjaksoa, viisi pistettä, neljä rinnakkaista putkea joka pisteellä) määritettiin keräimiin laskeutunut epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen määrä, jotka plotattiin toisiaan vasten. Näille pisteille laskettiin lineaarinen regressiosuora.

$$y = kx + a \Leftrightarrow \text{SPOM} = k * \text{SPIM} + a$$

Suoran ja y-akselin leikkauspistettä **a** käytettiin resuspensionopeuden laskemiseen.

$$R = \text{SPM} - a, \text{ jossa}$$

R = resuspensionopeus

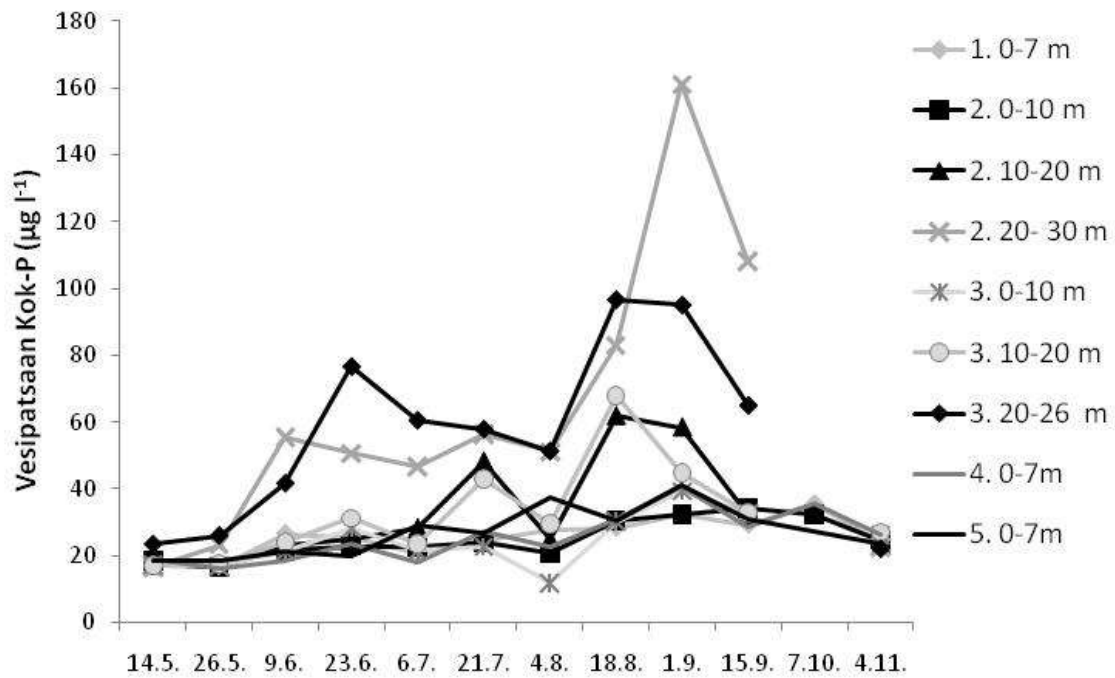
SPM = bruttosedimentaatio (= SPIM + SPOM)

Bruttosedimentaatio mitattiin edellä mainituilla sedimentaatiokeräimillä. Sedimentoituneen aineksen orgaaninen aines (SPOM) määritettiin standardin SFS 3008 mukaisesti.

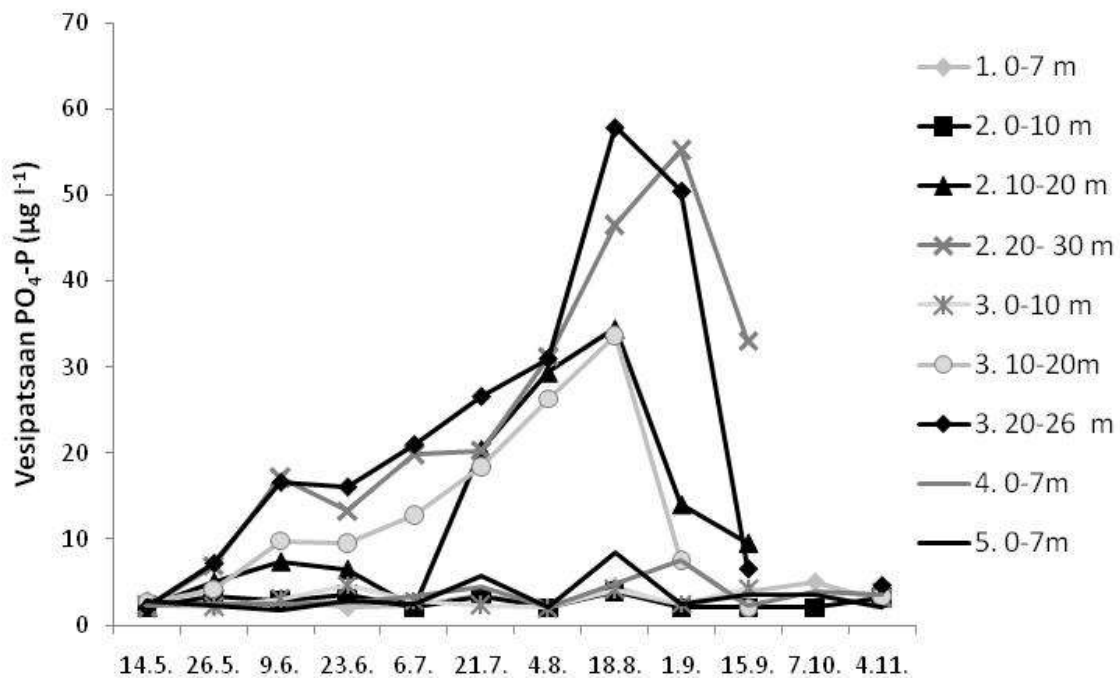
Sedimentin resuspendoitumisen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus laskettiin resuspensionopeuden ja pintasedimentin kokonaisfosforipitoisuuden tulona (Horppila & Nurminen 2001). Pintasedimentinäytteet (0–1 cm) otettiin HTH-corer noutimella jokaisen sedimentaationäytteenottojaksojen lopussa ja näytteiden kokonaisfosforipitoisuus määritettiin kuivatuista näytteistä (60 °C) optisella ICP (inductively coupled plasma) laitteella typpihappohajotuksen jälkeen.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Sekä kokonais- että fosfaattifosforipitoisuuksissa havaittiin selkeä nousu loppukesällä ja alkusyksystä (18.8. ja 1.9.). Fosforin kertyminen vesipatsaaseen oli havaittavissa etenkin Lankiluodon ja Enonsaaren syvänteiden (pisteet 2 ja 3) syvemmissä vesikerroksissa harppauskerroksen (n. 10 m) alapuolella (kuvat 2 ja 3). Kasvukauden edetessä tapahtuva liukoisen fosforin väliaikainen akkumuloituminen alusveteen johtuu yleensä siitä, että fosforin vapautuminen on biologista ja kemiallista sidontaa nopeampaa (Hupfer & Lewandowski 2008). Kokonaisfosforin nousu johtui kasvavan planktonbiomassan sedimentoitumisesta ja sedimentin resuspendoitumisesta (ks. kappale 3.2).



Kuva 2. Kokonaisfosforipitoisuus Enonselän eri syvyysvyöhykkeissä avovesikaudella 2009 (1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syväne, 3. Enonsaaren syväne, 4. Messilä, 5. Puolasaari, ks. kuva 1).

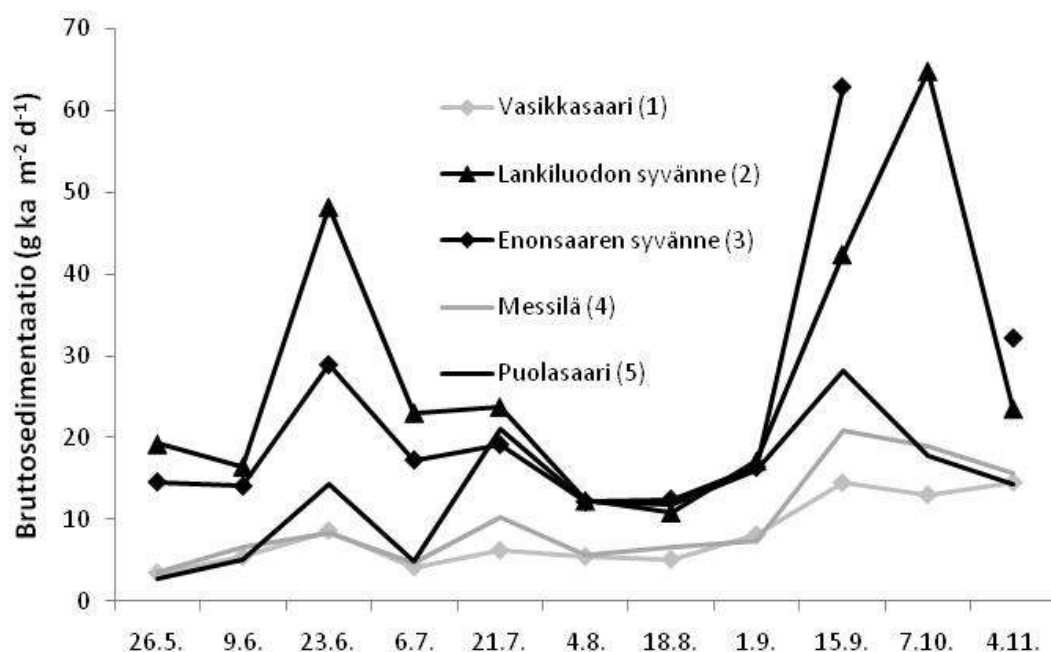


Kuva 3. Fosfaattifosforipitoisuus Enonselän eri syvyysvyöhykkeissä avovesikaudella 2009 (1. Vasikkasaari, 2. Lankiluodon syväne, 3. Enonsaaren syväne, 4. Messilä, 5. Puolasaari, ks. kuva 1).

3.1 Ravinnetaseyhtälö

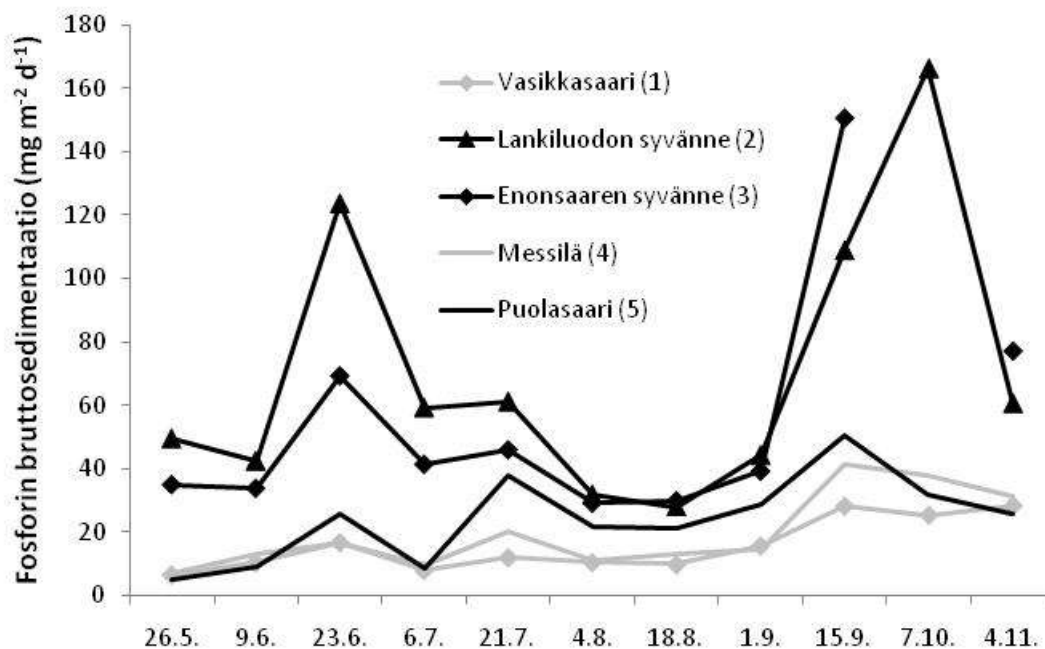
3.1.1 Fosforin bruttosedimentaatio, BS

Enonselän bruttosedimentaatio vaihteli voimakkaasti avovesikauden 2009 aikana ja tulokset olivat samaa tasoa aikaisemmin tehtyjen sedimentaatiomittausten kanssa (Koski-Vähälä 2001). Eri mittausjaksoista lasketut koko avovesikauden keskiarvot vaihtelivat välillä 8–28 g kuiva-ainetta $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Alhaisimmat arvot (2–3 g $\text{ka m}^{-2} \text{d}^{-1}$) mitattiin matalilta alueilta touko-kesäkuun vaihteessa ja heinäkuun alussa (kuva 4). Suurimmat tulokset (29–65 g $\text{ka m}^{-2} \text{d}^{-1}$) saatiin kesäkuun sekä syys-lokakuun mittausjaksoilta syvänpisteiltä (kuva 4). Kesäkuun mittausjakson (9.–23.6.) korkeat tulokset johtuivat todennäköisesti kevään piilevämaksimin sedimentoitumisesta ja kesäkuussa vallinneiden voimakkaiden tuulten aiheuttamasta sedimentin resuspendoitumisesta. Syksyn mittausjaksoilla (1.–15.9. ja 15.9.–7.10.) loppukesän kasviplanktonmaksimien sedimentoituminen sekä kerrostuneisuuden purkautuminen (resuspension voimistuminen) nostivat sedimentoituvan aineksen määrää. Suurimmat sedimentaatiotulokset mitattiin Lankiluodon (piste 2) ja Enonsaaren (piste 3) syvänteistä (kuva 4). Sedimentoituvan aineksen fosforipitoisuus eri näytteenottopisteillä vaihteli välillä 1,75–2,57 mg g^{-1} ja suurimmat pitoisuudet mitattiin niin ikään syvänpisteiltä.



Kuva 4. Bruttosedimentaatio (g kuiva-ainetta $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) Enonselällä näytteenottopisteillä 1–5 avovesikaudella 2009.

Fosforin bruttosedimentaatio vaihteli välillä 5,11–166,30 mg m⁻² d⁻¹ (kuva 5). Suurinta P:n bruttosedimentaatio oli syvänpisteillä, koska näillä alueilla myös sedimentaatio sekä laskeutuvan aineksen P-pitoisuus olivat suurimmat. Jotta ravinnetaseyhtälön termi BS olisi luotettava, laskettiin sille alueellisesti kattava keskiarvo, josta matalilta alueilta (< 10 m) mitatun P:n bruttosedimentaation osuus oli 83 % ja syviltä (> 10 m) mitatun 17 %. Alueellisesti painotettua keskiarvoa, BS = 27,14 mg m⁻² d⁻¹, käytettiin sisäistä kuormitusta laskettaessa. Kun fosforin bruttosedimentaatio laskettiin vain Lankiluodon syvänteessä olleen keräimen perusteella, tulokseksi saatiin 70,53 mg m⁻² d⁻¹. Syvänekeräimet saattavat antaa yliarvion koko järven bruttosedimentaatiosta johtuen sedimentaation fokuoimisesta etenkin jyrkkäreunaisiin syvänteisiin (Bloesch & Uehlinger 1986, Hilton ym. 1986).



Kuva 5. Fosforin bruttosedimentaatio (mg m⁻² d⁻¹) Enoselällä näytteenotuspisteillä 1–5 avovesikaudella 2009.

3.1.2 Ravinnetaseyhtälön termit UK, LP ja dm/dt

Vuonna 2009 ulkoinen fosforikuormitus Enoselälle oli 0,38 mg m⁻² d⁻¹ ja luusuasta poistuva ravinnevirta 0,09 mg m⁻² d⁻¹ (hoitokalastus 0,03 mg m⁻² d⁻¹ otettu huomioon). Nämä tulokset olivat samaa tasoa vuonna 1988 tehtyjen laskelmien kanssa (taulukko 1). Enonselän vesimassan fosforisisällön muutos aikavälille 14.5.–4.11. 2009 oli 0,13 mg m⁻² d⁻¹ (taulukko 1).

3.1.3 Sisäinen kuormitus, SK

Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus Enonselällä, $27,06 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, oli lähes fosforin bruttosedimentaatiota vastaava ja kaksinkertainen vuoden 1988 tulokseen verrattuna. Sisäisen ja ulkoisen fosforikuormituksen suhde oli 72 (taulukko 1). Sisäisten prosessien, SK ja BS, hallitseva merkitys ainetaseissa on reheville järville tyypillistä ja vastaava tilanne on havaittu Enonselällä aikaisemminkin (Lappalainen & Matinvesi 1990) (taulukko 1). On tärkeää huomata, että kun sisäinen fosforikuormitus laskettiin vain Lankiluodon syvänekeräimen perusteella, tulos ($70,46 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) oli 2,6-kertainen verrattuna alueellisesti kattavien sedimentaatiotulosten perusteella tehtyihin laskelmiin (taulukko 1). Luottaessa vain syvänekeräinten tuloksiin tehdään ravinnetaselaskelmissa todennäköisesti yliarvio todellisesta sisäisestä kuormituksesta.

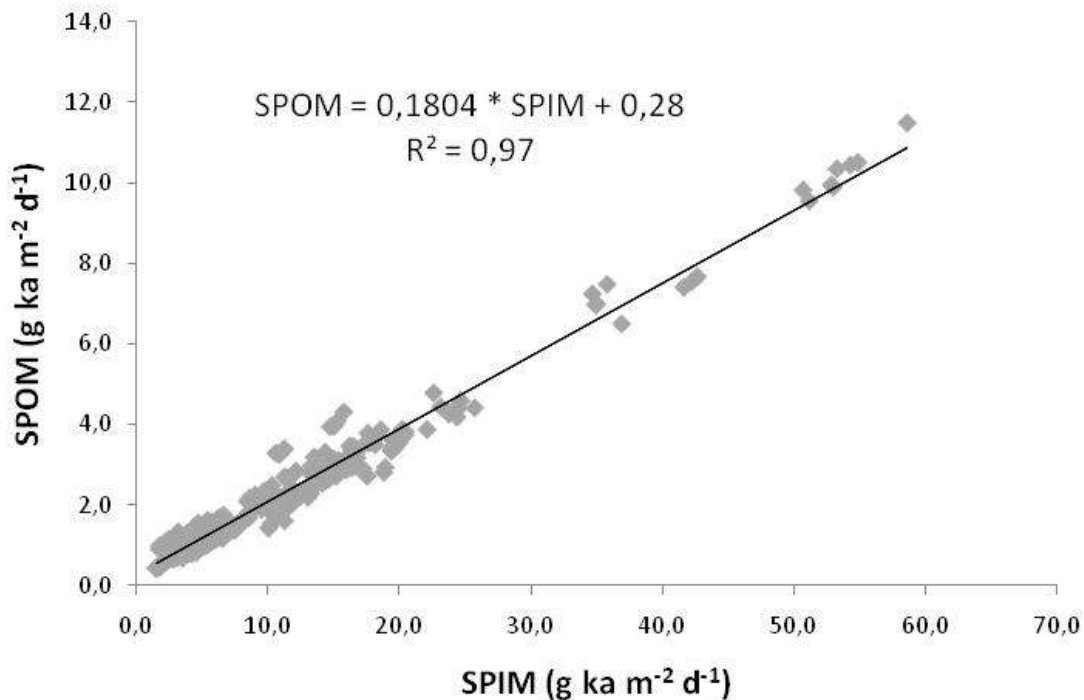
Taulukko1. Ravinnetaseyhtälön osatermit Enonselällä 14.5.–4.11. 2009 ja vuonna 1988 (vuoden 1988 tulokset keskiarvoja ilman talven tuloksia, laskettu taulukosta 2, s.79, Lappalainen & Matinvesi 1990). UK = ulkoinen fosforikuormitus, LP = luusuasta poistuva ravinnevirta, BS = fosforin bruttosedimentaatio, dm/dt = vesimassan fosforisisällön muutos, SK = sisäinen fosforikuormitus.

	2009 keräimet alueellisesti kattavasti		vain Lankiluodon keräin	1988 (Lappalainen & Matinvesi)
	kg P a^{-1}	$\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
UK	3567	0,38	0,38	0,57
LP (+hoitokal.)	1661	0,09	0,09	0,18*
dm/dt	1228	0,13	0,13	1,02
BS	257515	27,14	70,53	13,82
SK	256838	27,06	70,46	12,99
SK/UK	72	72	223	23

* ei hoitokal.

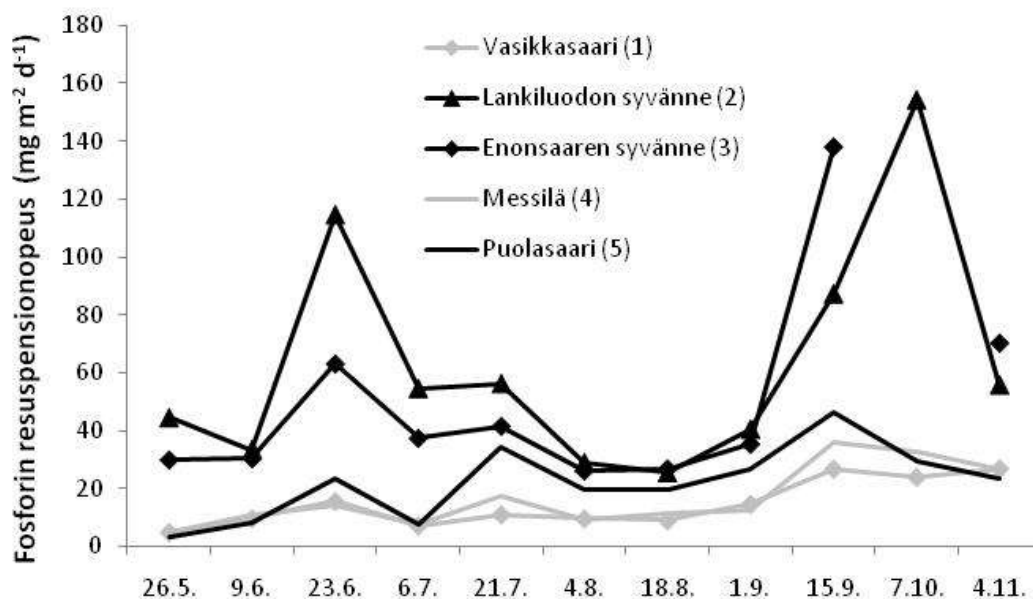
3.2 Sedimentin resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus

Avovesikaudelta 2009 kerätty sedimentaatioaineisto muodosti tilastollisesti merkittävän regression ($p < 0,001$) sedimentoituvan epäorgaanisen ja orgaanisen aineksen välille. Regression selitysaste oli korkea ($R^2 = 0,97$) ja regressiosuoran ja y-akselin leikkauspiste $a = 0,28$ (kuva 6). Laskeutuvan aineksen sekä regressiosuoran ja y-akselin leikkauspisteen avulla laskettu sedimentin resuspendoituminen muodosti avovesikauden aikana 88–99 % bruttosedimentaatiosta.



Kuva 6. Epäorgaanisen (SPIM) ja orgaanisen (SPOM) sedimentoituneen aineksen välinen regressio.

Sedimentin resuspensio vaikutti voimakkaasti Enonselän sisäiseen fosforin kiertoon avovesikaudella 2009, sillä sen aiheuttama sisäinen fosforikuormitus (alueellisesti kattava keskiarvo $24,36 \text{ mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) oli 90 % ravinnetaseyhtälöllä lasketusta sisäisestä kuormituksesta. Kun jokaiselta näytteenotopisteeltä ja sedimentaatiomittausjaksolta saadut resuspensiotulokset kerrottiin näytteenotopisteiden pintasedimenttien fosforipitoisuudella, resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus vaihteli välillä $3,48\text{--}138,15 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (kuva 7). Voimakkainta kuormitus oli syvännepisteillä (pintasedimentin fosforipitoisuus suurin) kesäkuussa ja syys-lokakuussa, jolloin fosforin bruttosedimentaatiokin oli suurinta. Korkeimman kuormituksen ajankohtina havaittiin myös vesipatsaan korkeimmat kokonais- ja fosfaattifosforipitoisuudet syvännepisteillä harppauskerroksen alapuolella (kuvat 2 ja 3). Koska resuspension aiheuttama sisäinen fosforikuormitus laskettiin kokonaisfosforipitoisuuksina, oli syys-seuraus –suhde vesipatsaan pitoisuuksiin selvä, mutta vaikutusta fosfaattifosforipitoisuuksiin oli vaikeampi arvioida. Suoraa vaikutusta liukoisen fosforin pitoisuuksiin resuspensionopeuksien perusteella on vaikea laskea, mutta sedimentin resuspensio voi siirtää runsaasti liukoista fosforia sisältävää huokosvettä vesipatsaaseen diffuusiota voimakkaammin (Reddy ym. 1996). Toisaalta partikkeleihin sitoutunut resuspendoitunut fosfori on vapautuessaan hajotuksen tai kemiallisten reaktioiden (esim. ligandinvaihto, Andersen 1975) vuoksi heti vesipatsaassa planktisten levien käytössä.



Kuva 7. Fosforin resuspendoituminen ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) Enonselällä näytteenottpisteillä 1–5 avovesikaudella 2009.

4. Johtopäätökset

Enonselällä loppuvuodesta 2009 käynnistetty hapetusprojekti pyrkii vähentämään järvioltaan fosfaattifosforipitoisuuksia. Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää kuormitustaso, jolta kunnostustoimet alkavat.

Kokonais- ja fosfaattifosfori akkumuloituivat alusveden kerrostuneisuuden edetessä vuonna 2009.

Ravinnetaseyhtälöllä laskettu sisäinen fosforikuormitus oli korkea etenkin suhteessa ulkoiseen kuormitukseen (72-kertainen). Todenmukaisten ravinnetaselaskelmien tekeminen vaatii alueellisesti kattavia sedimentaatiomittauksia, sillä vain syvänekeräinten käyttö bruttosedimentaatiota mitatessa johtaa yliarvioon sisäistä kuormitusta laskettaessa (tässä tutkimuksessa 2,6-kertainen).

Sedimentin ja sen myötä fosforin resuspendoituminen vaikutti voimakkaasti Enonselän sisäiseen fosforikuormitukseen muodostaen 90 % ravinnetaseyhtälöllä lasketusta sisäisestä kuormituksesta. Sedimentin resuspendoituminen vaikutti selkeästi alusveden kokonaisfosforipitoisuuksien nousuun lämpötilakerrostuneisuuden aikana. Fosfaattifosforin osalta oli vaikeampi sanoa, missä suhteessa alusveden pitoisuuden nousu avovesikauden edetessä johtui jo sedimentin huokosvedeen vapautuneen

fosforin diffundoitumisesta, liukoisen fosforin resuspendoitumisesta ja fosforin vapautumisesta resuspendoituneista partikkeleista vesipatsaassa.

Vaikka sisäinen kuormitus oli moninkertainen ulkoiseen verrattuna, ulkoisen kuormituksen merkitys järven ekologialle voi olla erittäin suuri, sillä sedimentin resuspendoituminen kierrättää järveen tulevia ravinteita takaisin vesipatsaaseen mahdollisesti useankin kertaan ennen pysyvää sedimentoitumista. Lisäksi käynnissä oleva hapetusprojekti saattaa vaikuttaa Enonselän resuspensio-olosuhteisiin (vaikutus lämpötilaan ja kerrostuneisuuteen) ja resuspensioista johtuviin sisäisiin kuormitusprosesseihin. Näin ollen kunnostustoimien vaikutusten tiivis seuranta on tarpeen.

5. Lähdeluettelo

Andersen, J.M. (1975). Influence of pH on release of phosphorus from lake sediments. *Archiv für Hydrobiologie* 76: 411–419.

Bloesch, J. & Uehlinger, U. (1986). Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss Lake. *Limnol. Oceanogr.* 31: 94–1109.

Gasith, A. (1975). Tripton sedimentation in eutrophic lakes - simple correction for the resuspended matter. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 19: 116–122.

Hilton, J., Lishman, J. P. & Allen, P. V. (1986). The dominant processes of sediment distribution and focusing in a small, eutrophic monomictic lake. *Limnol. Oceanogr.* 31: 125–133.

Horppila, J. & Nurminen, L. (2001). The effect of an emergent macrophyte (*Typha angustifolia*) on sediment resuspension in a shallow north temperate lake. *Freshwater Biology* 46: 1447–1455.

Hupfer, M. & Lewandowski, J. (2008). Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments – a long-lasting paradigm in limnology. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 93 (4–5): 415–432.

Koski-Vähälä, J. (2001). Role of resuspension and silicate in internal phosphorus loading. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Limnologian ja ympäristönsuojelun laitos.

Lappalainen, K. M. & Matinvesi, J. (1990). Järven fysikaalis-kemialliset prosessit ja ainetaseet. Teoksessa V. Ilmavirta (toim.): Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet. Yliopistopaino, Helsinki, s. 54–84.

Liboriussen, L., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Thorsgaard, I., Grünfeld, S., Jakobsen, T.S. & Hansen, K. (2009). Effects of hypolimnetic oxygenation on water quality: results from five Danish lakes. *Hydrobiologia* 625: 157–172.

Reddy, K.R., Fisher, M.M. & Ivanoff, D. (1996). Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake. *J. Environ. Qual.* 25: 363–371.

Saarijärvi, E. & Sammalkorpi, I. (2005). Kunnostustarpeen määrittäminen. Teoksessa V. Ilmavirta (toim.): Järvien kunnostuksen ja hoidon perusteet. Yliopistopaino, Helsinki, s. 61–74.

Thamdrup, B., Hansen, J. W. & Jørgensen, B. B. (1998). Temperature dependence of aerobic respiration in a coastal sediment. *FEMS Microbiology Ecology* 25: 189–200.

Weyhenmeyer, G.A. (1997). Quantification of resuspended particles in sedimentation traps. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 271–276.

Weyhenmeyer, G.A. (1998). Resuspension in lakes and its ecological impact – a review. *Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 51: 185–200.